

# PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LAS ROCAS ZEOLITIZADAS DE CABO DE GATA, ALMERÍA ESPAÑA

**Jorge L. Costafreda Mustelier<sup>(1)</sup>, Benjamín Calvo Pérez<sup>(2)</sup> y Esteban Estévez Fernández<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup> *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Calle de Ríos Rosas, 21 28003. Madrid, España, E-mail: [costafreda@yahoo.es](mailto:costafreda@yahoo.es)*

<sup>(2)</sup> *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Calle de Ríos Rosas, 21 28003. Madrid, España, E-mail: [benjamin\\_calvo@yahoo.es](mailto:benjamin_calvo@yahoo.es)*

<sup>(3)</sup> *Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO), Calle de Alenza, 1, 28003, Madrid, España, E-mail: [estebanestevez@hotmail.com](mailto:estebanestevez@hotmail.com)*

## RESUMEN

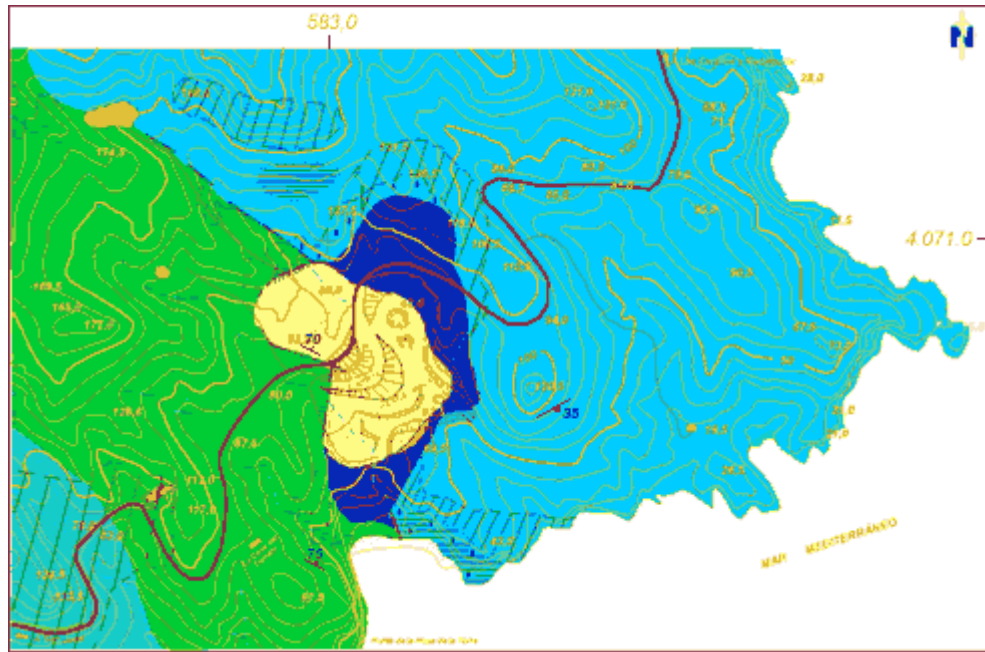
Las rocas zeolitizadas del Complejo Volcánico del Sureste Español han cobrado especial importancia en los dos últimos años. Varias empresas cementeras españolas han puesto su interés en la exploración y aplicación de la zeolita como aditivo natural para la producción de cementos puzolánicos. Diversos ensayos de DRX, FRX, MEB y el estudio de secciones delgadas petrográficas han demostrado que la mordenita es el mineral mayoritario en estas rocas: sobre el 50-60 %. El resto de los componentes son plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, pirita, yeso, hematita y materiales amorfos. Los ensayos físicos, mecánicos y químicos han confirmado el excelente comportamiento de esta zeolita en sus mezclas con morteros de cemento aportándole altas resistencias mecánicas a diferentes edades de fraguado, en rangos de variación entre 25,9 – 27,4 Mpa a 7 días, 42,6-51,4 Mpa a 28 días y 51,3-70,1 Mpa a 90 días. Los ensayos químicos de puzolanidad a 7 y 15 días demostraron las capacidades altamente reactivas de estas zeolitas, las cuales se comportan como un material puzolánico adecuado. Todas las muestras se ubicaron por debajo de la curva isoterma de solubilidad del hidróxido de calcio, tanto a 7 como a 15 días, de acuerdo al ploteo de los resultados de los análisis químico de puzolanidad. En la comparación con otros materiales puzolánicos de distintas génesis las zeolitas de Cabo de Gata han destacado en calidad por sus propiedades.

## ABSTRACT

Zeolitized rocks from Volcanic Complex of the Spanish southeastern have gained especial importance in the two last years. Several Spanish companies of cement have focussed their interest on the exploration and application of the zeolite as natural additive material on the production of pozzolanic cements. Many assays, mainly XRD, XRF, SEM and thin sections petrography study, have demonstrated that mordenite is the principal mineral in the composition of these rocks: over 50-60 %. The rest of the mineral are plagioclase, K-feldspar, quartz, pyrite, gypsum, hematite and amorphous materials. The mechanical, physical and chemical assays have confirmed the excellent behaviour of this zeolite mixed with cement mortar, given its high mechanical resistances to different ages, with ratios of 25,9-27,4 Mpa to seven days, 42,6-51,4 Mpa to twenty-eight days and 51,3-70,1 Mpa to nineteen days. Chemical pozzolanic assays of both, seven days and fifteen days, have demonstrated the high reactive capacity of this zeolite which seems to be an adequate pozzolanic material. All samples were under isotherm calcium hydroxide solubility line to seven days as well as fifteen days age, according to the plotting of the pozzolanic chemical assays. A comparison between this zeolite and other pozzolanic materials from southeastern Spanish area was done into the mark of this paper, in which the zeolite emphasized its quality properties.

## GEOLOGÍA LOCAL

Las zeolitas a las cuales hace alusión el presente trabajo, yacen en un entorno compuesto por variadas litologías de génesis volcánica y vulcanosedimentaria, entre las cuales figuran andesitas con estructura disyuntiva columnar, generalmente frescas, de matriz vítrea porfídica, tobas vitrocrystalitoclástica de composición dacítica, dacitas brechosas autoclásticas, piroclastos y brechas de proyección de composición dacítica y lapilli (Arribas, A. 2005) (Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. 2005) (ver figura 1).



### LEYENDA

	Zeolita compuestas por mordenita esmectitas, plagioclasa, feldespatos potásicos, cuarzo, pirita, hematita, materiales amorfos y trazas de yeso		Contactos reales entre litologías
	Bentonita bandreada con intercalaciones de materiales piroclásticos de composición dacítica y tobácea. Está compuesta por piroxeno, plagioclasa, biotita, material arcilloso (esmectita), zeolita de formación incipiente y fragmentos líticos de reducido diámetro		Contactos inferidos
	Andesitas con estructura disyuntiva-columnar, textura porfídica de matriz fina vítrea, constituida mayormente por piroxenos y plagioclasas sericitizadas		Zona con marcada limonización y carbonización subordinada
	Tobas vitrocrystalitoclástica preferentemente de composición dacítica		Circuitos de alteración hidrotermal con desarrollo de carbonización, silicificación, epidotización y cloritización
	Dacitas, piroclastos y brechas de composición dacítica y tobácea.		Contacto litológico visible con evidencias de fuerte reacción metasomática
			Fallas comprobadas (en trazos continuos)
			Fallas supuestas (en líneas discontinuas)
			Zonas de brechamiento fuerte
	Curvas de nivel		
	Cursos fluviales de fuerte gradiente generalmente secos		
	Talud de los frentes de explotación		
	Pista		

Figura 1: Mapa geológico de la zona de los trabajos escala 1:10.000

En los afloramientos las rocas zeolitizadas presentan coloraciones blanca, beige, azul pálida y gris claro, con tonalidades azuladas y en ocasiones pardo rojizas ocasionado por reacciones superficiales con el oxígeno del aire y las aguas meteóricas. Muy pocas veces aparecen cristalinas y por lo general forman masas concrecionales residuales de alteración, creando pequeños mantos arcillosos de igual coloración; otras veces son porosas y transicionan a bentonita (Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. 2005) (ver figura 2).



Figura 2: Afloramiento de zeolita variedad mordenita, según análisis de DRX y FRX, en la zona de estudios.

Se encuentran cruzadas frecuentemente por diaclasas que se inclinan con ángulos verticales y subverticales.

Los planos de fallas que afectan a los principales afloramientos tienen rumbo N 80° O e inclinación de 55° Sur en el flanco occidental del área.

## **CARACTERIZACIÓN DE LAS ZEOLITAS**

El análisis de las secciones delgadas petrográficas demostró que la zeolita se ha formado por un proceso de alteración metasomática con zeolitización parcial y total, acompañada de pirita y materiales arcillosos del grupo de las esmectitas y cuarzo residual (ver figura 3).

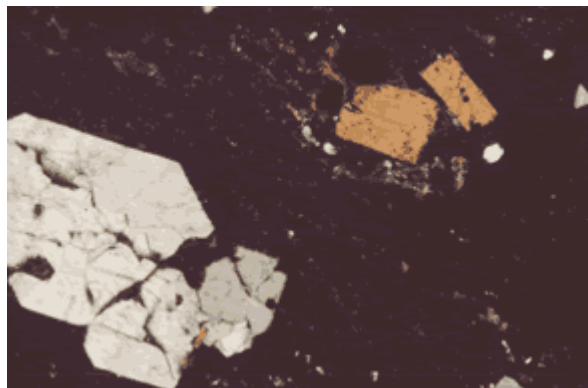


Figura 3: Microfotografía de la sección delgada de la muestra SJPET-6-2. Mostrando en primer plano un cristal de piroxeno totalmente zeolitizado, quebrado y desplazado sobre una matriz zeolitizada y bentonitizada. Están presentes, además, biotita y plagioclasa.

Los trabajos de Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X revelaron los siguientes porcentajes de minerales presentes: mordenita (43-57 %), esmectita (17-19%), plagioclasa (5-12%), feldespatos potásico (3-5%), cuarzo (6-14%), pirita (2%), yeso (trazas), hematita (2%) y materiales amorfos en general (12-14 %) (Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. 2005) y (Giannetto, Giuseppe, Montes, Arturo, Rodríguez, Gerardo. 2000) (ver figura 4).

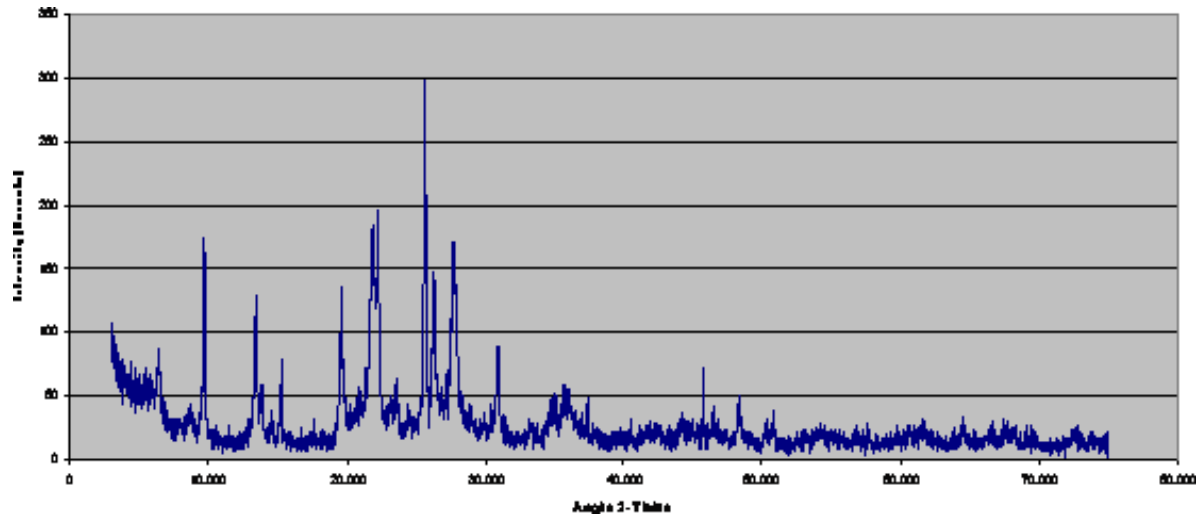


Figura 4: Difractograma de zeolita variedad mordenita correspondiente a la muestra SJ-7 del Punto de documentación N° 3.

Los trabajos de Microscopía Electrónica de Barrido detectaron la presencia de mordenita en forma de cristales alargados, fibrosos, que forman paquetes alineados paralelos de haces, con coloraciones gris clara hasta blanca. En muchas ocasiones los cristales de mordenita aparecen truncados por esmectitas, demostrando que éstas últimas se formaron con posterioridad a aquéllas (ver figura 5).

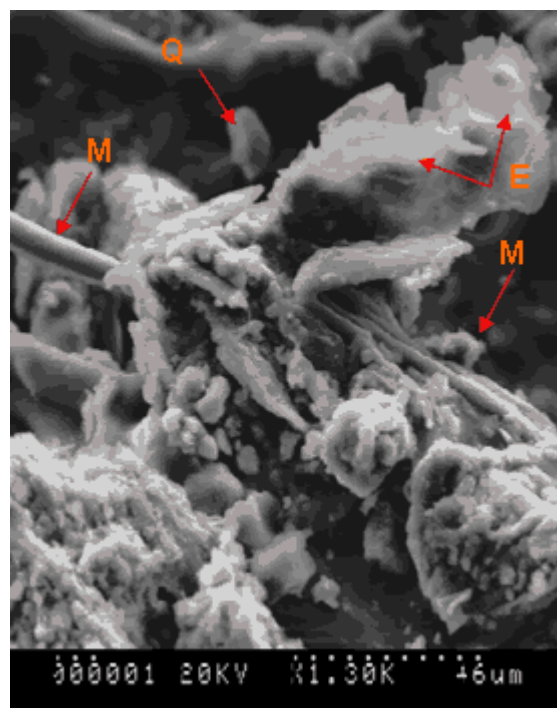


Figura 5: Micrografía de mordenita en paragénesis con esmectita y cuarzo (MEB). Muestra SJ-7. **M**-mordenita; **E**- esmectita; **Q**- cuarzo.

La esmectita: aparece de dos formas, la primera, como escamas subredondeadas, con bordes en forma de crestas, dentadas y apilándose entre sí como esflorescencias que llegan a compactarse por completo. Son comunes las formas tabulares, estriadas y fibrosas que crecen directamente desde la base de las escamas descritas. Estos dos tipos de esmectitas son más tardías que la mordenita, formándose, al parecer, a expensas de esta última. La otra forma en que aparecen las esmectitas es como racimos alargados de cristales romboédricos alargados de colores gris claro hasta blanco. Son muy compactas entre sí y al parecer se encuentran tomando la forma de los antiguos minerales preexistentes. Esta variedad es claramente posterior a la formación de las mordenitas (Utada, M. 2001).

El cuarzo se presenta con colores grises oscuros, con hábito hipidiomórfico a xenomórfico, dipiramidal, diseminado de forma aislada en toda la muestra. La presencia del cuarzo no se sabe si es posterior o anterior a las esmectitas y a la mordenita, por la forma que tienen los granos es posible que se haya formado en una amplia gama de tiempo, que va desde la cristalización en rangos de temperaturas mayores a condiciones de baja temperatura en donde rellenó cavidades o se precipitó entre los demás cristales (Castroviejo, Ricardo. 1999).

La fórmula calculada para la mordenita de este yacimiento es::



La relación Si / Al es de 4,34 (Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. 2005) y (Coombs, D., Alberti, A., Thomas, et all. 1997).

## ENSAYOS FÍSICOS MECÁNICOS

### Preparación de los componentes del mortero

En estos trabajos se emplearon 5 muestras de zeolitas (ver tabla 1) micronizadas hasta los 0.063 mm. La composición química de las muestras de zeolitas empleadas en estos ensayos se ofrece en la tabla N° 1. Los morteros fueron preparados con dosificación de 75% Cemento de Referencia (CR) y 25% Pozzolana de zeolita (PZ), que en términos de cuantificación correspondieron a 375 gramos de (CR) (El Cemento de Referencia empleado fue el Cemento Portland tipo I, con clase de resistencia 42,5 R de elevada resistencia inicial, cuyo código se expresa como: CEM I 42,4 R), 125 gramos de (P) y 225 gramos de H<sub>2</sub>O obteniéndose una cantidad total de 500 g de mezcla cemento-puzolana, de la cual se seleccionó un volumen de 450 gramos para fabricar los moldes, después de la mezcla final con arena normalizada y agua destilada. La mezcla se realizó manualmente aplicando movimientos rotatorios a la bolsa de plástico que la contenía. Posteriormente fueron pesados 225 gramos de agua normalizada y 1.350 ± 5 gramos de arena normalizada CEN-NORMSAND DIN EN 196-1 (UNE-EN 196-1:1996).

Tabla 1: Composición química de las materiales empleados como puzolanas en el presente trabajo (Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. 2005).

MUESTRA	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
SJ-7	68,30	11,95	1,56	1,27	1,15	2,89	1,38	0,083
SJ-9	68,42	9,64	1,27	1,09	1,20	3,63	2,14	0,113
SJ-20	67,04	12,55	1,17	1,37	1,54	2,64	1,79	0,101
SJ-26	68,84	13,07	1,64	1,43	1,99	2,85	2,39	0,115
SJ-29-A	61,49	16,36	1,87	2,0	1,48	3,17	3,62	0,115

Tabla 2: Composición química típica de las puzolanas de origen volcánico en %

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Variación	42-73	10-20	1-14	0-12	0-11	1-5	1-5	0-0,5
Promedio	54,7	15,8	5,5	4,7	2,1	3,2	3,1	-

Fuente: (Tobón, J. 2000).

Tabla 3: Exigencias mecánicas y físicas dadas como valores característicos de las resistencias iniciales y normales según norma europea

Clase de Resistencia	Resistencia a compresión MPa			
	Resistencia inicial		Resistencia normal	
	2 días	7 días	28 días	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-		
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	-		
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-		

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### Resistencias iniciales a la edad de 7 días

Todas las muestras cumplieron con las exigencias mecánicas de resistencia inicial al compararse con lo decretado en la tabla 1. En dicha tabla no existe la especificación de resistencias iniciales a los 7 días para la clase de cemento de referencia empleado, pero para los 2 días ( $\geq 10$  MPa) se infiere que lo cumple satisfactoriamente si se observa las lecturas de resistencia a compresión correspondientes.

La muestra con mayor resistencia mecánica inicial ha sido la SJ-26, lo que demuestra que la reacción puzolánica se ha verificado en un espacio de tiempo corto; le siguen las muestras SJ-20 (29,1 Mpa), SJ-29-A (27,4 Mpa), SJ-9 (26,6 Mpa) y por último la SJ-7 (25,9 Mpa). El valor de resistencia más alto está, no obstante, a 12,9 puntos por debajo del Cemento de Referencia (Ver tabla 4).

Tabla 4: Resultados de las resistencias mecánicas a flexión y a compresión para muestras de morteros con zeolita natural y del cemento de referencia a la edad de 7 días.

Nº MUESTRA	Resistencias mecánicas a 7 días	
	Resistencia flexión (Mpa)	Resistencia a Compresión (Mpa)
SJ-7-7	197	25,9
SJ-9-7	190	26,6
SJ-20-7	162	29,1
SJ-26-7	208	29,8
SJ-29-A-7	181	27,4
Cemento referencia	300	42,7

En la figura 6 se aprecia la variación en los valores de resistencia a compresión de cada una de las muestras involucradas para una edad de 7 días, y su comparación con los valores de resistencia inicial del Cemento de Referencia.

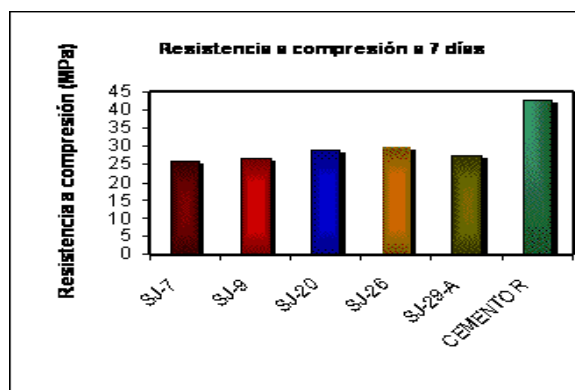


Figura 6 : Resistencia a compresión a 7 días (CEMENTO R= Cemento de referencia)

A pesar de que a esta edad los valores de las resistencias mecánicas arrojadas por todas las muestras guardan una cercana uniformidad, se ha deseado destacar la muestra SJ-26 como la más reactiva, la cual ha iniciado una rápida reacción puzolánica con los componentes del mortero, ganando una resistencia mecánica significativa, es interesante señalar que esta muestra posee, en este caso, los más altos contenidos en  $\text{SiO}_2$  (68,84 %) y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,07 %) lo que corrobora un teorema tradicional de las puzolanas que señala que el contenido de estos óxidos son importantes a la hora de evaluar las propiedades puzolánicas de un material dado (Rabilero, A. 1988) y (La Luz, A. B. 1995). Le sigue la muestra SJ-20 con contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 67,04 % y 12,55, respectivamente, la cual ocupa una posición imperceptiblemente menor que la SJ-26 en el gráfico de la figura N° 6.

### Resistencias normales a 28 días

Los resultados de los ensayos de resistencia normal obtenidos para esta edad confirman que todas las muestras cumplen con las exigencias mecánicas regidas por la Norma Europea EN 196-1, y cuyos parámetros están representados en la Tabla 3. Todos los valores se encuentran dentro del rango ( $\geq 42,5 - \leq 62,5$  Mpa).

El valor más alto corresponde a la muestra SJ-7 (51,7 Mpa), seguida por las muestras SJ-9 (48,9 Mpa), SJ-26 (47,8 MPa), SJ-20 (44,0 MPa) y por último la SJ-29-A (42,6 MPa), estando ésta última muy cerca del límite inferior señalado por la norma para esta edad (42.5 MPa) (ver tabla 5).

Las muestras con mayor valor, preferentemente la SJ-7, superan radicalmente el límite inferior de resistencia normal, incluso al Cemento de Referencia (50,6 MPa), lo que indica su fuerte reactividad puzolánica. Esto se corrobora si se observa la figura 11, en la cual las muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-26, toman una posición profunda con respecto a la curva isoterma de solubilidad, en el área de reacción puzolánica activa.

En el gráfico de la figura 7 se observan las posiciones relativas de las muestras en el espacio con respecto a sus valores de resistencia mecánica a 28 días.

Tabla 5: Resultados de las resistencias mecánicas a flexión y a compresión para muestras de morteros con zeolita natural y del cemento de referencia a la edad de 28 días.

Nº MUESTRA	Resistencias mecánicas a 28 días	
	Resistencia flexión (Mpa)	Resistencia a Compresión (Mpa)
SJ-7-7	6,7	51,4
SJ-9-7	6,1	48,9
SJ-20-7	6,4	44,0
SJ-26-7	6,8	47,8
SJ-29-A-7	5,9	42,6
Cemento referencia	9,0	50,6

La observación del gráfico de la figura 7 permite deducir un desfase ascendente experimentado por todas las muestras, adquiriendo valores de resistencias muy cercanos a los del (CR), sin embargo, descuella la muestra SJ-7 (51,4 MPa) con respecto a la SJ-26 (47,8 MPa) cuyo valor, a la edad de 7 días, había sido superior al del resto de las muestras, seguida por la muestra SJ-9 (48,9 MPa).

La muestra SJ-7 a esta edad supera en 0,8 décimas la resistencia normal del cemento de referencia. Se deduce, en este caso otra de las propiedades principales de las puzolanas en el sentido que aportan valores de resistencias mecánicas muy bajos a edades cortas (2 y 7 días), en cambio, adquieren altas resistencias a edades superiores, generalmente a partir de los 28 días de fraguado, incluso antes (Rabilero, A. 1988) y (UNE-EN 197-1:2000).



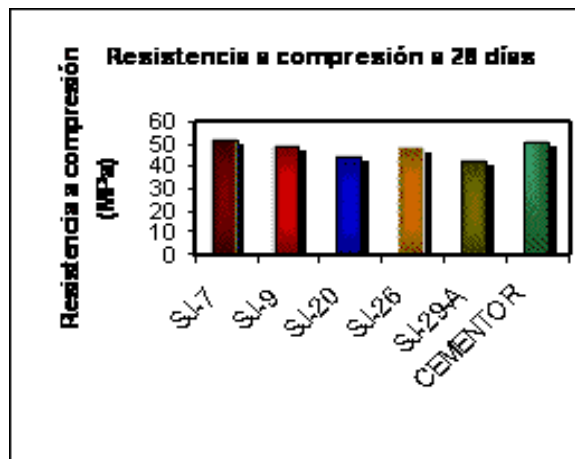


Figura 7: Resistencia a compresión a 28 días

Si tenemos en cuenta que las puzolanas tienen una fuerte propensión a reaccionar vigorosamente con el hidróxido de calcio u otras sales cálcicas en presencia de agua a temperatura ambiente, que el fraguado del (CR) empleado, según se establece en la Norma Europea EN 196-1, se considera completo a los 28 días, y que como consecuencia de este fraguado se liberan grandes cantidades de hidróxido de calcio (20-30%) de todo el presente en el cemento hidratado, se comprenderá mejor por qué la reacción puzolánica, y por consiguiente el aumento de la resistencia mecánica, crecen a partir de este tiempo (Rosell, M., Gayoso, R., Calvo, B. 2002).

La deducción anterior constituye, a nuestro juicio, una conclusión importante del presente trabajo.

### Resistencias mecánicas a 90 días

Aunque la Tabla 3, correspondiente a la Norma Europea EN 196-1, sólo contempla rangos permisibles de variación de resistencias mecánicas iniciales y normales para las edades de 2, 7 y 28 días, se ha comparado, no obstante, con los valores de resistencias obtenidos de las mismas muestras citadas a la edad de 90 días. Así, pues, todas las muestras cumplen con el rango de valores exigidos por la norma para la edad de 28 días. Los resultados de resistencias mecánicas arrojados por estas muestras son: SJ-26 (70,1 MPa), SJ-9 (66,3 MPa) SJ-7 (62,7 MPa), SJ-20 (57,4) y SJ-29-A (51,3 MPa); en tanto que el valor de resistencia, o límite referenciado, del (CR) fue de 68,4 MPa) (ver tabla 6 y figura 8).

En adición a esto se llega a la conclusión de que a edades superiores a los 28 días la resistencia mecánica, tanto a flexión como a compresión, aumenta significativamente.

Por otra parte se debe destacar que la reacción puzolánica prevalece en el tiempo, mucho después de los períodos normales de fraguado, neutralizándose así los excesos de hidróxido de calcio insolubles en el mortero y en el hormigón, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras (UNE-EN 196-5:1996, UNE-EN 196-1:1996, UNE-EN 197-1:2000).



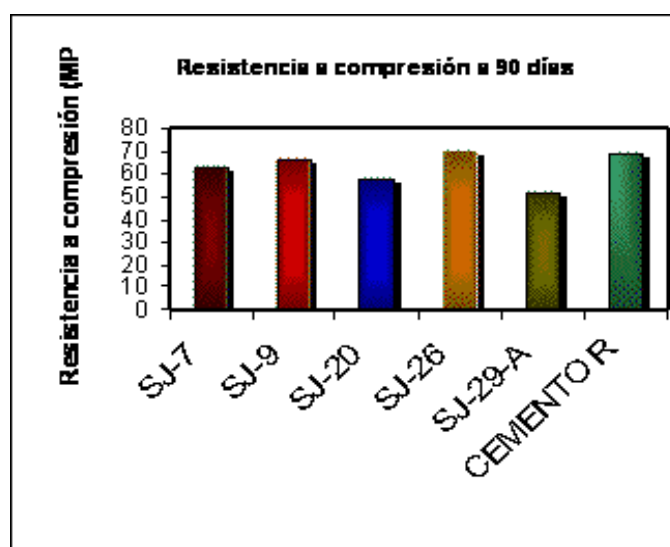


Figura 8: Resistencia a compresión a 90 días

Los valores que exhiben las muestras SJ-7 y SJ-9, muy reactivas a la edad de 28 días, explican que a la edad de 90 días han completado prácticamente su reacción puzolánica y, por consiguiente, han logrado su estabilidad química a través de la neutralización de los iones de calcio disueltos. Sin embargo, la muestra SJ-26 toma a esta edad valores desproporcionados de resistencias (70,1 MPa) que supera, no sólo a las muestras más reactivas citadas anteriormente, sino también al (CR) (68,4 MPa), obteniéndose una estructura sumamente resistente.

Tabla Nº 6: Resultados de las resistencias mecánicas a flexión y a compresión para muestras de morteros con zeolita natural y del cemento de referencia a la edad de 90 días.

Nº MUESTRA Tabla Nº 7	Resistencias mecánicas a 90 días	
	Resistencia flexión (Mpa)	Resistencia a Compresión (Mpa)
SJ-7-7	6,6	62,3
SJ-9-7	7,6	66,3
SJ-20-7	6,9	57,4
SJ-26-7	5,8	70,1
SJ-29-A-7	6,0	51,3
Cemento referencia	9,7	68,4

Las razones por las cuales ocurre esto tienen su explicación en los mecanismos de reacción puzolánica; es decir, la muestra SJ-26 inicialmente reaccionó de forma lenta, con lo cual la neutralización del proceso de reacción necesitó más tiempo para completarse, caso contrario al de las muestras SJ-7, SJ-9, SJ-20 y SJ-29-A, donde el desencadenamiento de la reacción puzolánica fue prácticamente instantáneo y la neutralización se manifestó en un período de tiempo menor. (Calvo, B., Estévez, E., Costafreda, J 2005).

Como regla general, el aumento de resistencia es bajo después de los 28 días en aquellos cementos que tienen porcentajes mayores de resistencia mecánica a los 3 y 7 días; por el contrario, aquéllos que tienen bajos porcentajes a edades tempranas aumentan sus resistencias en forma muy significativa a largo plazo (Rabilero, A. 1988).

## COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN A 28 DÍAS CON LOS DE OTRAS PUZOLANAS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO DEL SURESTE DE ESPAÑA

En la tabla 7 se hace una comparación general de la composición química de las muestras objeto de nuestro estudio con otras muestras con propiedades puzolánicas del Complejo Volcánico del Sureste español (Calvo, B., Estévez, E. y Costafreda, J.L., 2005) y (López, J., Rodríguez, E. (1980) y en los gráficos de las figuras 9 y 10 quedan también consignados.

En la tabla 8 se ofrece de forma comparativa los valores de resistencia a flexión y a compresión de ambas poblaciones de muestras para la edad de 28 días.

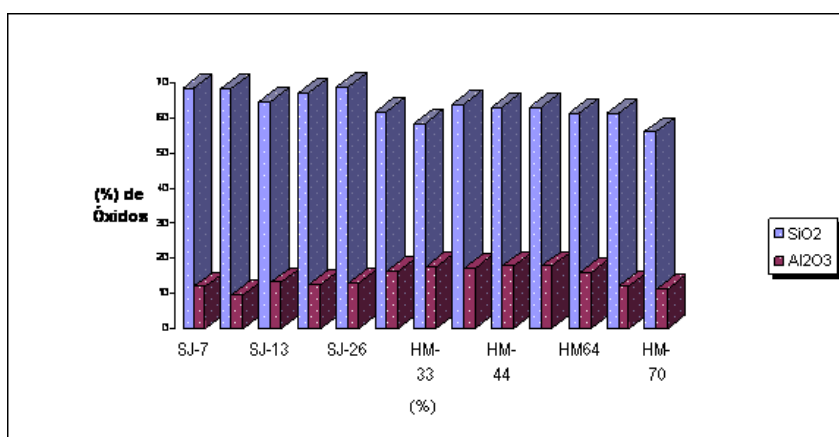


Figura N° 9: Comparación de los contenidos de SiO<sub>2</sub> y AlO<sub>2</sub> correspondientes a las muestras objetos de estudios con otros materiales con propiedades puzolánicas del sureste de España

Tabla N° 7. Comparación de las muestras objeto de estudio con otros materiales puzolánicos del Sureste de España en relación a su composición química.

Comp (%)	Tipo de roca												
	Calco-alcalina							Calco-alcalina potásica y shoshonítica				Ultrapotásica	
	SJ-7	SJ-9	SJ-13	SJ-20	SJ-26	SJ-29-A	HM-33	HM-18	HM-44	HM-52	HM64	HM-36	HM-70
SiO <sub>2</sub>	68,30	68,42	64,49	67,04	68,84	61,49	58,40	63,67	63,00	63,00	61,30	61,22	56,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,95	9,64	13,19	12,55	13,07	16,36	17,53	17,12	17,77	17,77	15,80	12,21	11,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,56	1,27	1,60	1,17	1,64	1,87	4,79	0,67	0,65	0,65	0,25	2,06	2,23
MnO	-	-	0,05	-	-	-	0,09	0,09	0,05	0,05	0,08	0,04	0,08
MgO	1,27	1,09	2,09	1,37	1,43	2,00	3,66	1,84	2,44	2,44	3,66	4,57	9,27
CaO	1,15	1,20	0,873	1,54	1,99	1,48	8,32	2,47	2,97	2,97	5,23	2,72	4,21
Na <sub>2</sub> O	2,89	3,63	3,92	2,64	2,85	3,17	2,44	2,21	3,61	3,61	3,80	1,96	2,10
K <sub>2</sub> O	1,38	2,14	2,99	1,79	2,39	3,62	1,07	3,56	3,85	3,85	2,40	5,71	6,14
TiO <sub>2</sub>	0,083	0,113	0,119	0,101	0,115	0,115	0,43	0,68	0,67	0,67	0,54	1,23	1,35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,018	-	0,029	0,017	0,08	0,21	0,33	0,33	0,20	0,77	0,81
H <sub>2</sub> O	7	8	5	5	8	6	1,55	2,27	3,20	3,20	2,50	4,88	2,91
Cl	0,082	0,462	0,906	0,085	0,747	0,274	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>3</sub>	-	0,062	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,06

Tabla Nº 8. Comparación de las muestras objeto de estudio con otros materiales puzolánicos del Sureste de España en relación a sus valores de resistencia mecánica a flexión y a compresión a la edad de 28 días.

MUESTRA	Tipo de material	PROCEDENCIA			Resistencia a la flexión a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión a 28 días (N/mm <sup>2</sup> )
		LOCALIDAD	COORDENADAS			
			N	E		
SJ-7	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 841.0	583 020.0	6,7	51,4
SJ-9	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 790.0	583 035.0	6,1	48,9
SJ-10	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 763.0	583 061.0	5,8	51,8
SJ-11	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 822.0	583 070.0	6,0	50,1
SJ-12	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 870.0	583 060.0	6,6	51,4
SJ-13	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 931.0	583 110.0	5,2	44,9
SJ-15	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 872.0	583 140.0	5,3	45,8
SJ-20	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 871.0	582 960.0	6,4	44,0
SJ-26	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 070 737.0	583 045.0	6,8	47,8
SJ-29-A	Rocas zeolitizadas	Cabo de Gata, Almería	4 071 189.0	582 683.0	5,9	42,6
HM-18	Dacitas biotíticas con cordierita y almandita	Carboneras	4 090 967	573 531	6,2	41,8
HM-33	Rocas volcánicas poligénicas	Sorbas	4 098 994	599 478	6,9	42,6
HM-36	Veritas.	Vera	4 118 020	597 227	6,5	45,1
HM-52	Dacitas, riolacitas, tobas y vitrófidos.	Mazarrón	4 167 472	640 303	6,4	42,1
HM-64	Andesitas piroxénicas con alteración hidrotermal.	Cartagena	4 166 120	685 426	5,4	39,2
HM-70	Lamproítas.	Murcia	4 207 464	678 375	6,6	47,1

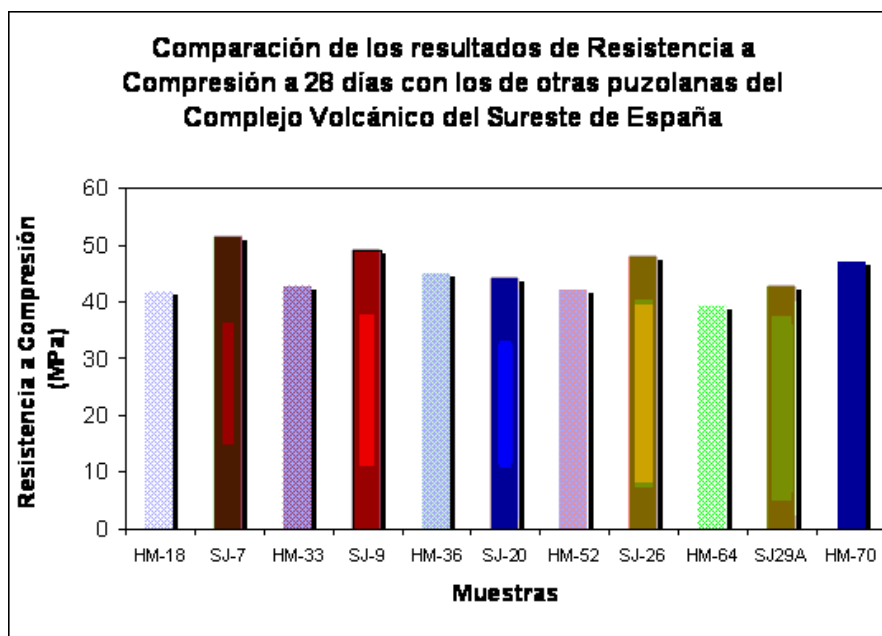


Figura Nº 10: Gráfico comparativo de resultados de resistencia a compresión a 28 días arrojados por las muestras objeto de estudio con los de otras puzolanas del Complejo Volcánico del Sureste de España

## DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS A 7 DÍAS

Para la determinación de las propiedades puzolánicas de estas zeolitas se tomaron 20 g de la mezcla (CR) + (Pz) y se depositaron en 100 ml de agua destilada a 40 °C, previamente calentado, se agitó la solución durante 20 segundos y posteriormente se colocó en una estufa. A los 7 días se filtró la solución y se dejó reposar a temperatura ambiente.

En la Tabla 9 se muestra la relación de las muestras seleccionadas para ser sometidas a los ensayos químicos de puzolanidad a 7 y a 15 días, respectivamente.

Tabla 9: Relación de muestras empleadas en la determinación de las propiedades puzolánicas y su composición química.

MUESTRA	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
SJ-7	68,30	11,95	1,56	1,15	1,27	1,38	2,89	-
SJ-9	68,42	9,64	1,27	1,20	1,09	2,14	3,63	0,062
SJ-10	65,51	11,99	1,54	1,56	1,43	1,50	2,42	-
SJ-11	63,28	12,08	1,44	2,05	1,73	2,39	2,82	0,071
SJ-12	67,04	10,09	1,56	2,30	1,56	1,98	2,05	0,057
SJ-13	64,49	13,19	1,60	0,873	2,09	2,99	3,92	-
SJ-15	65,99	14,01	1,72	1,16	1,85	3,03	2,89	-
SJ-20	67,04	12,55	1,17	1,54	1,37	1,79	2,64	-
SJ-26	67,25	13,47	1,63	1,56	2,21	1,78	1,55	-

Los reactivos empleados fueron indicador naranja de metilo, ácido clorhídrico 0,1 M, hidróxido de sodio al 10 %, indicador de murexida, solución EDTA 0,025 M (UNE-EN 196-5:1996).

El cálculo de la concentración de los iones hidroxilo [OH<sup>-</sup>] se basó en la siguiente expresión:

$$[\text{OH}^-] = \frac{1\,000 \times 0,1 \times V_3 \times f_2}{50} = 2 \times V_3 \times f_2$$

donde

[OH<sup>-</sup>] es la concentración en iones hidroxilo en milimoles por litro;

V<sub>3</sub> es el volumen de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l que se ha gastado en la valoración, en milímetros;

f<sub>2</sub> es el factor de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l

La determinación de la concentración de óxido de calcio [CaO] se llevó según la fórmula siguiente:

$$[\text{CaO}] = \frac{1\,000 \times 0,025 \times V_4 \times f_1}{50} = 2 \times V_4 \times f_1$$

donde

[CaO] es la concentración en óxido de calcio, en milimoles por litro;

V<sub>4</sub> es el volumen de la disolución de EDTA que se ha gastado en la valoración, en milímetros;

f<sub>1</sub> es el factor de la disolución de EDTA.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Al observar el diagrama de la figura 11 se observa que la muestra más reactiva es la SJ-7, que ocupa la posición más profunda dentro del área ubicada bajo la curva isoterma de solubilidad a 40° del hidróxido de calcio, con valores de concentración de los iones hidroxilo de 49,4 mmolOH/l y de concentración de óxido de calcio de 5,5 mmol/l. Es seguida por las muestras SJ-9 (concentración de iones de hidroxilo de 48,0 mmolOH/l y de concentración de óxido de calcio de 6,5 mmol/l) y la SJ-10 (concentración de iones de hidroxilo de 43,7 mmolOH/l y de concentración de óxido de calcio de 6,3 mmol/l).

Las tablas 10, 11 y 12 representan un ejemplo de la naturaleza de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para algunas de las muestras analizadas a 7 días.

Tabla N° 10: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-7** a 7 días.

MUESTRA: SJ- 7					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	24,30	49,4	49,4	3,22
2	1,016	24,30	49,4		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,007	10,90	5,5	5,5	0,07
2	1,007	10,90	5,5		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLÁNICO		
	7		SI		

Tabla N° 11: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-9** a 7 días.

MUESTRA: SJ- 9					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMNEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	23,60	48,0	48,0	3,12
2	1,016	23,60	48,0		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,005	12,95	6,5	6,5	0,07
2	1,005	12,95	6,5		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLÁNICO		
	7		SI		

Tabla Nº 12: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-10** a 7 días.

MUESTRA: SJ- 10					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMNEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	21,50	43,7	43,7	2,85
2	1,016	21,50	43,7		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,007	12,50	6,3	6,3	0,07
2	1,007	12,50	6,3		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLÁNICO		
	7		SI		

Estos datos reflejan que las muestras citadas poseen la más alta capacidad para atrapar la cal libre existente en el clinker del cemento portland con el cual se han mezclado. Así, pues, recurriendo a los resultados plasmados en las tablas 10, 11 y 12, y que se transcriben en el párrafo que inicia este capítulo, se determina que la muestra SJ-7 tiene una capacidad de reacción puzolánica, y por consiguiente de absorción de cal libre (CaO), superior al resto de muestras que han tomado parte de este ensayo, provocando el mayor abatimiento en la concentración de óxido de calcio en la solución en un 5,5 mmol/l, en tanto que ha logrado reconcentrar en la solución una porción de iones de hidroxilo de 49,4 mmol<sup>-</sup>OH/l. Este proceso es importante ya que constituye la base para la formación de compuestos estables como tobermorita y portlandita (UNE-EN 196-5:1996).

En el caso de las muestras SJ-9 y SJ-10, respectivamente, ha ocurrido prácticamente lo mismo sólo que sus capacidades de captación de cal libre y de concentración de iones de hidroxilo poseen rangos de valores ligeramente inferiores, lo cual puede verse en las antes mencionadas tablas y en párrafos anteriores.

El resto de las muestras forma una población muy cercana a la curva isoterma de solubilidad, por debajo de ella, indicando que poseen, igualmente, propiedades puzolánicas de magnitud adecuada, según lo exigido por la norma UNE-EN 196-5:1996. La concentración en iones hidroxilo detectada en estas muestras varía en un orden de magnitud entre los 50,4 y los 41,2 mmol<sup>-</sup>OH/l, mientras que la capacidad de concentración de óxido de calcio varía entre los 8,4 y 9,4 mmol/l, respectivamente.

A la edad de 7 días, las muestras exhiben propiedades puzolánicas claras y manifiestas, y se distinguen por su tendencia a formar dos categorías principales, la primera formada por las muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-10, analizadas a inicios del epígrafe, y la segunda categoría está compuesta por SJ-15, SJ-13, SJ-20, SJ-26, SJ-11 y SJ-12. Este orden de descripción de la segunda categoría está dado por la ordenación de los valores de concentración de iones hidroxilo, de mayor a menor, detectado en cada una de las muestras.

## DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS A 15 DÍAS

Las mismas muestras analizadas a 7 días fueron reanalizadas a 15 días según la norma UNE-EN196-5:1996, arrojando resultados diferentes. Los métodos de preparación de las muestras y las soluciones son idénticos a los descritos en páginas anteriores.

En primer lugar, las muestras que a 7 días poseían menor actividad puzolánica se muestran a los 15 días muy reactivas, provocando altas concentraciones de iones de hidroxilo, mientras que las más reactivas a edades inferiores tienden a alinearse en un sistema de reacción suave y uniforme de incremento paulatino en el tiempo (ver figura 12). De este modo, las muestras SJ-15 (concentración de iones de hidroxilo de 65,4 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 3,0 mmol/l) y SJ-13 (concentración de iones de hidroxilo de 63,8 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 3,0 mmol/l) han provocado las mayores concentraciones de iones de hidroxilo y el mayor abatimiento en los contenidos de óxido de calcio (CaO) hasta niveles prácticamente insignificantes.

En las tablas 13, 14 y 15 se presentan los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para las muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-10 para 15 días.

Tabla N° 13: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-7** a 15 días

MUESTRA: SJ- 7					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMNEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	31,60	64,2	64,2	0,56
2	1,016	31,60	64,2		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,020	5,91	3,6	3,6	0,50
2	1,020	5,91	3,6		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLANICO		
	15		SI		

Tabla N° 14: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-9** a 15 días

MUESTRA: SJ- 9					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMNEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	30,50	62,0	62,0	0,54
2	1,016	30,50	62,0		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,020	6,15	3,8	3,8	0,52
2	1,020	6,15	3,8		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLÁNICO		
	15		SI		



Tabla N° 15: Representación de los resultados del ensayo químico de puzolanidad de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo y de óxido de calcio para la muestra **SJ-10** a 15 días

MUESTRA: SJ- 10					
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMNEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,016	27,70	56,30	56,3	0,50
2	1,016	27,70	56,30		
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO					
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,025 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	MEDIA	INCERTIDUMBRE
1	1,020	6,80	4,2	4,2	0,57
2	1,020	6,80	4,2		
	RESULTADOS				
	DÍAS		PUZOLÁNICO		
	15		SI		

La figura 11 muestra las posiciones en el diagrama de las muestras analizadas por el método de ensayo químico de puzolanidad a 7 días (con relleno en azul) y a 15 días (con relleno en rojo). de acuerdo a los valores de concentración de los iones hidroxilo (en el eje de las abscisas) y de óxido de calcio (en el eje de ordenadas).

La figura 12 representa la ubicación de las poblaciones de resultados obtenidos a 7 y a 15 días a partir de las muestras analizadas por el mismo método. La línea de tendencia (en azul), indica una regularidad sistemática en el estado de la reacción puzolánica para todas las muestras a esa misma edad.

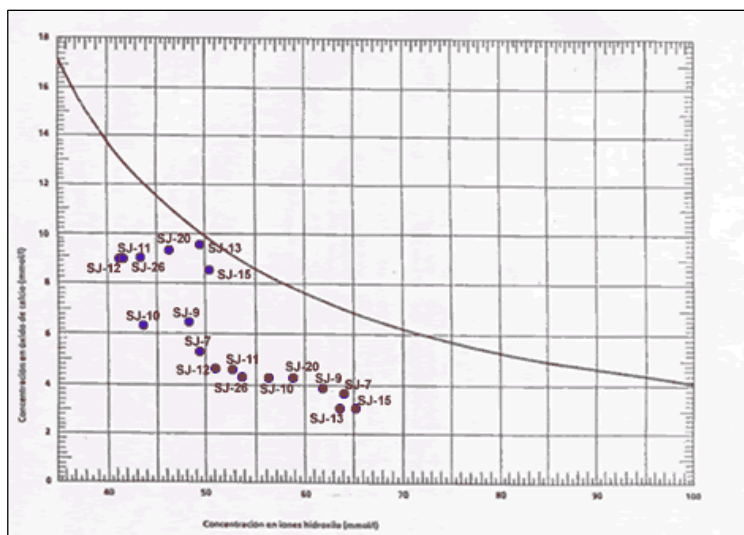


Figura N° 11: Ubicación de las muestras analizadas por análisis químico de puzolanidad a 7 y a 15 días.

Le siguen a éstas las muestras SJ-7 (concentración de iones de hidroxilo de 64,2 mmol<sup>+</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 3,6 mmol/l) y SJ-9 (concentración de iones de hidroxilo de 62,0 mmol<sup>+</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 3,8 mmol/l) manteniendo sus marcadas propiedades puzolánicas a esta edad. A continuación, la muestra SJ-20 (concentración de iones de hidroxilo de 58,7 mmol<sup>+</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 4,2 mmol/l), SJ-10

(concentración de iones de hidroxilo de 56,0 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 4,0 mmol/l), SJ-11 (concentración de iones de hidroxilo de 52,8 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 4,5 mmol/l), SJ-26 (concentración de iones de hidroxilo de 52,6 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 4,3 mmol/l) y SJ-12 (concentración de iones de hidroxilo de 51,2 mmol<sup>-</sup>OH/l y de concentración de óxido de calcio de 4,6 mmol/l).

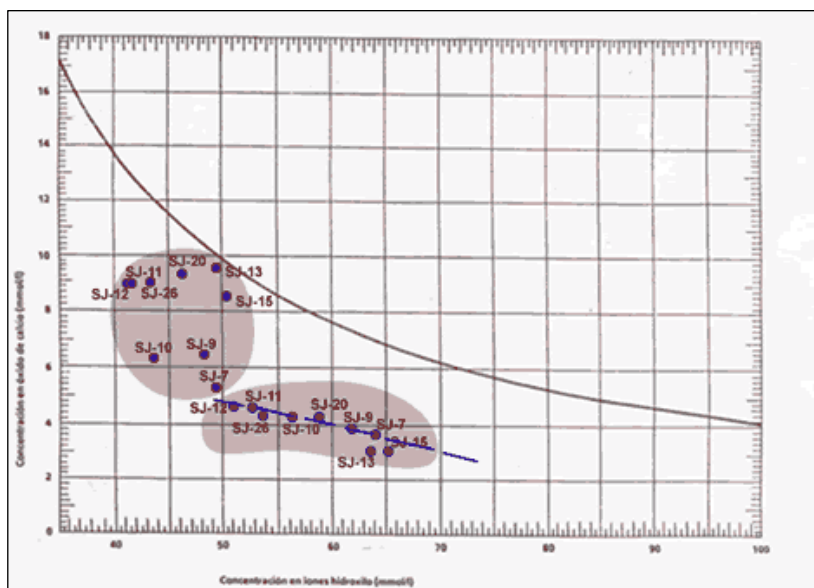


Figura N° 12: Poblaciones de resultados obtenidos a 7 y a 15 días a partir de las muestras analizadas por el método de ensayo químico de puzolanicidad.

El aspecto más interesante a esta edad que ofrece el ploteo de las muestras en el diagrama es la tendencia lineal de todos los valores, estableciéndose una normalización aritmética de los mecanismos de reacción a medida que transcurre el tiempo, este criterio pone de manifiesto que las puzolanas poseen velocidades de reacción muy diferentes en los primeros estadios, pero que la reacción empieza a desencadenarse normalmente a edades superiores, cercanas a los 28 días y aun mayores.

Al trazar una línea de tendencia a lo largo del eje de ubicación de las muestras a 15 días se observa que la tendencia es la linealidad con una inclinación aproximada de 3° que produce un paralelismo general con la curva de solubilidad y al mismo tiempo una profundización en dirección al eje de abscisas, lo que produce dos cosas: mayor disminución de la concentración del CaO y un aumento cada vez mayor de la concentración de iones hidroxilo.

## CONCLUSIONES:

1.- Las muestras analizadas aportan a la mezcla con morteros de cemento resistencias mecánicas que superan el límite inferior de resistencia normal establecido en la norma, incluso, estos valores se incrementan sensiblemente en el tiempo, con lo cual el empleo de estas zeolitas en la fabricación de concretos y hormigones queda justificado.

2.- Los valores de resistencias obtenidos a 7 días no superan los valores arrojados por el CR, sin embargo, a la edad de 28 y 90 días los valores de resistencia aportados por el mortero con adición de (Pz) se acercan notablemente a los del (CR), incluso logran superarlo en algunos casos, esto significa que la reacción puzolánica entre estos materiales y los componentes del mortero prevalece en el tiempo, por encima de los períodos normales de fraguado, lo que permite neutralizar los excesos de hidróxido de calcio insolubles en el mortero y en el hormigón, lo cual representa un aporte de estabilidad para las estructuras.

3.- La comparación de los valores de resistencias mecánicas y de los aportados por los ensayos químicos de puzolanidad ha permitido concluir que existe una relación directamente proporcional entre las propiedades puzolánicas y dichas resistencias, es decir, que en la medida que la zeolita sea más reactiva mayor resistencia aportará al mortero en el tiempo.

4.- Las muestras de zeolita empleadas tienen comportamiento distinto para cada edad, lo que delata la influencia de la cristalinidad y la composición química en las reacciones entre la pasta y las (Pz), aunque debe destacarse que el rango de variación de los resultados aportados por cada una de ellas no oscila entre grandes valores.

5.- Las zeolitas de Cabo de Gata, Almería, muestran una marcada actividad puzolánica importante, y su composición química está dentro del promedio para las puzolanas, lo cual convierte el yacimiento en un área perspectiva para el abastecimiento de materiales para cementos puzolánicos a las fábricas españolas, preferentemente las que tienen concesiones en el sur y sureste de España.

6.- Las muestras con mayor actividad puzolánica a 7 días fueron: SJ-7, SJ-9 y SJ-10, siendo la de mayor calidad de reacción la SJ-7, seguida de la SJ-10 y la SJ-9; esto significa que estas muestras tienen una capacidad mayor para atrapar la cal de la solución acuosa. El resto de las muestras (SJ-11, SJ-12, SJ-13, SJ-15, SJ-20 y SJ-26, a pesar de mostrar un carácter reactivo importante, se sitúan dentro de parámetros de valores cercanos que las ubica en un nivel estable.

7.- Las muestras SJ-7, SJ-9 y SJ-10, con más alto índice de puzolanidad, coinciden con los puntos del yacimiento donde los materiales son zeolitas variedad mordenita de más alta calidad.

8.- La muestra SJ-15, ubicada muy cerca de la isoterma de solubilidad a 40 °C, es la que ha reaccionado más lentamente a la edad de 7 días, aumentando su tiempo de reacción, esta muestra corresponde a una toba dacítica del encajante del yacimiento, lo que demuestra que estas rocas tienen menor capacidad puzolánica, aunque no peores, que las zeolitas vecinas.

9.- Las muestras analizadas a 15 días muestran mayor actividad puzolánica que a edades menores, con lo cual se concluye que el aumento y la calidad de las reacciones puzolánicas es función directa del tiempo.

10.- Al comparar las propiedades puzolánicas de las zeolitas de Cabo de Gata con las de otros materiales del territorio español resaltan la calidad de las primeras, dado, posiblemente, a los altos contenidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y por las propias características inherentes a la zeolita, fundamentalmente el intercambio catiónico.

## BIBLIOGRAFÍA

Arribas Moreno, Antonio. 2005. Rodalquilar. Revista Bocamina. Nº 15 abril 2005. 90 pp.

Calvo, B., Costafreda, J.L., Estévez, E. (2005) Caracterización preliminar de las zeolitas del yacimiento "Los Murcianos" Almería. V Congreso Internacional de Geoquímica. Soria (España) 2005. 10 p.

Calvo, B., Estévez, E., Costafreda, J.L (2005). Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. V Congreso Internacional de Geoquímica. Soria (España) 2005. 10 p.

Castroviejo, Ricardo. 1999. Edificios volcánicos y estructuras de colapso en relación con las mineralizaciones auríferas de Rodalquilar: una nueva interpretación. Depto. Ingeniería Geológica E.T.S.I. de Minas de Madrid Apuntes de clases. 28 pp.

Coombs, Douglas S., Alberti, Alberto, Armbruster, Thomas, et al. 1997. Recommended nomenclature for zeolite minerals : Report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Minerals Names. The Canadian Mineralogist 35 pp.

Giannetto, Giuseppe, Montes, Arturo, Rodríguez, Gerardo. 2000. Zeolitas. Características, propiedades y aplicaciones industriales. Editorial Innovación tecnológica. Caracas. 351 pp.  
Tobón, Jorge I. 2000. Puzolanas en los alrededores de Irra. Revista de La Facultad de Minas Dyna. Medellín , N° 129, 7 pp.

La Luz, A. B. 1995. Zeolitas: Propiedades e usos industriais. Serie tecnologica 68. CETEM. Rio de Janeiro. 36 p.

López Ruiz, J., Rodríguez Badiola, E. (1980): La región volcánica neógena del sureste de España. Estudios Geológicos N° 36, pp 5-63, Madrid.

Rabilero, Antonio. 1988. Las puzolanas cinética de reacciones. Editorial Oriente. 114 pp.

Rosell, M., Gayoso, R., Calvo, B. 2002. Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. 11 p.

Tobón, Jorge I. 2000. Puzolanas en los alrededores de Irra. Revista de La Facultad de Minas Dyna. Medellín , N° 129, 7 pp.

UNE-EN 197-1:2000, Cemento; Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

UNE-EN 196-1:1996, Métodos de ensayo de cementos; Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

UNE-EN 196-5:1996, Métodos de ensayo de cementos; Parte 5: Ensayo de puzolanidad para cementos puzolánicos.

UNE 80303-1:2001, Cementos con características adicionales; Parte 1: Cementos resistentes a los sulfatos.

UNE 80303-2:2001, Cementos con características adicionales; Parte 2: Cementos resistentes al agua de mar.

Utada, Minoru. Zeolites in hydrothermally altered rocks. 2000. Natural zeolites: occurrence, properties, applications. 18 pp.